

175-178

# 微分消卷积法提高 PTR 检测系统 空间分辨率的研究\*

方建兴 王敏华<sup>√</sup> 王定兴 李佩赞  
(苏州大学物理系, 江苏, 苏州, 215006)

TH878

**A** **摘要** 分析了光热辐射测量(PTR)系统中温度场的分布特性及系统的传递函数对检测系统空间分辨率的影响. 采用微分消卷积方法对实测曲线进行处理, 结果表明, 该方法能大大提高系统的空间分辨率.

**关键词** 光热辐射测量(PTR), 微分消卷积, 空间分辨率.

无损检测

## 引言

④

近几年来, 包括光声、光热辐射等技术在内的热波技术在无损检测中得到了广泛的应用<sup>[1~2]</sup>. 光热辐射测量(PTR)技术与光声技术(PAS)相比, 具有不受样品尺寸限制, 不与样品接触的特点, 用于无损检测时主要能准确地掌握缺陷的位置、间距和尺寸等, 而这些量与系统的空间分辨率是密切相关的. 提高系统的空间分辨率的方法之一是提高入射光的调制频率<sup>[3]</sup>, 但调制频率的提高会降低系统的信噪比. 方法之二是可以对入射光进行聚集<sup>[4]</sup>, 但它受到实际条件的限制. 本文采用微分消卷积方法对实测谱进行消卷积处理, 通过减小检测系统传递线型函数的半宽度来提高系统的空间分辨率.

## 1 原理

从激光器出射的高斯光束, 光强为  $I(r) = I_0 e^{-r^2/a^2}$ , 式中  $a$  为光斑半径,  $I_0$  为中心光强. 由文献[5]可知: 对光不透明的样品, 当其热传导远大于样品表面的热交换时, 样品后表面各点的温度变化量为:

$$\delta T(r, l) = \sum_n \frac{2f_n J_0(K_n r)}{k\delta_n [\exp(\sigma_n l) - \exp(-\sigma_n l)]}, \quad (1)$$

式(1)中  $f_n$  是入射光强度分布按其本征函数, 即零阶贝塞耳函数  $J_0(K_n r)$  展开的系数. 对于高斯光束,

$$f_n = \begin{cases} \frac{a^2}{R^2} I_0 [1 - \exp(-\frac{R^2}{a^2})], & (n=0) \\ \frac{I_0}{J_0^2(K_n R)} \frac{a^2}{R^2} \exp(-\frac{K_n^2 a^2}{4}), & (n \neq 0) \end{cases} \quad (2)$$

\* 江苏省教委自然科学基金资助项目  
本文 1995 年 9 月 16 日收到, 修改稿 1996 年 1 月 30 日收到

$\sigma_r^2 = j \frac{\omega}{\alpha} + K_r^2$ ,  $\omega$  为入射光的调制圆频率,  $\alpha$  是样品的热扩散系数,  $K_r$  是满足样品侧面第三类边界条件  $J_0(K_r R)/J_1(K_r R) = K_r K/h_2$  的本征值, 由于实际样品  $l \ll R$ , 因此侧面热交换系数  $h_2 \approx 0$ , 从而使  $K_r$  仅由  $J_1(K_r R) = 0$  决定.

理论上, 从探测器得到的 PTR 信号  $h(r, l)$  (包括振幅与位相信号, 它们分别对应于温度场变化  $\delta T$  的模值与幅角) 可表示成真实信号  $f(r, l)$  与信号传递函数  $g(r, l)$  之卷积, 即

$$h(r, l) = f(r, l) \otimes g(r, l), \quad (3)$$

在 PTR 检测系统中, 信号传递函数  $g(r, l)$  又可近似地表示成温度场的本征线型函数与探测器、记录仪等的仪器函数之间的卷积. 一般来说, 仪器函数的影响较小 (因仪器分辨率较高), 而温度场本征线型函数由式 (1)、(2) 决定.

由于传递函数的存在, 使每一透射的 PTR 信号峰均有一定的宽度, 当两伤痕相距很近时, 导致 PTR 信号的两谱峰重叠, 造成伤痕位置、间距和尺寸的误测, 影响了 PTR 检测系统的分辨率. 从实测的 PTR 信号中减小直至消除传递函数的影响, 从而提高检测系统的空间分辨率, 在数学上被归结为消卷积问题.

微分消卷积法是用于消除线型函数影响、提高重叠谱图分辨率的新方法<sup>[6]</sup>, 由于它具有参数选择少、应用方便、结果清晰和直观等特点而受到关注. 对于高斯线型、洛伦兹线型以及 Voigt 线型函数 (高斯与洛伦兹线型函数的卷积), 我们已分别得到了它们的实用微分消卷积算符  $R_g$ 、 $R_l$  与  $R_v$ <sup>[7-9]</sup>:

$$R_g = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{1}{k!} W^{2k} D^{2k}, \quad (4)$$

$$R_l = \sum_{k=0}^N \frac{b_{2k}}{(2k)!} (-1)^k W^{2k} D^{2k}, \quad (5)$$

$$R_v = \sum_{k=0}^N (-1)^k C_{2k} D^{2k}; \quad (6)$$

式中  $D$  为微分操作算符,  $b_{2k}$ 、 $C_{2k}$  为权重因子,  $W$  为线型函数半宽度. 应用上, 只要计算实测谱的偶次微分, 再按不同的权重因子叠加, 就可减小直至基本消除线型函数的影响, 达到提高系统分辨率的目的.

## 2 实验结果

入射高斯激光束半径为  $a = 2\text{mm}$ . 对于  $R = 30\text{mm}$  的石墨样品, 从探测器得到的 PTR 归一化振幅信号  $A$  的径向分布曲线如图 1 实线所示, 图 1 中虚线为拟合的半宽度为  $W = 1.47\text{mm}$  的高斯线型函数. 由图 1 可见, PTR 检测系统的传递函数可近似为高斯线型函数. 对于紫铜样品, 可得到相同的结论.

图 2 中曲线  $a$  为从划有 3 组刻痕的石墨样

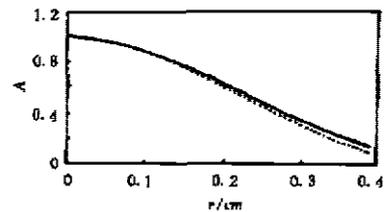


图 1 石墨样品归一化振幅径向分布曲线  
— 实验曲线 ..... 模拟曲线

Fig. 1 Normalized amplitude of graphite sample vs. its radius  
— experimental curve ..... simulated curve

品探测到的 PTR 振幅信号,它们均显示单峰,无法分辨相距很近的两刻痕.我们采用高斯线型函数的微分消卷积算符  $R_k$  (见式(4)),对该信号进行最大级次  $k=4$  的微分消卷积处理,结果见图 2 中曲线  $b$ ,这时原来重叠的信号已完全分辨.同样,对紫铜样品也进行了类似的处理,原始信号及消卷积后的结果分别见图 3 中曲线  $a$  和  $b$ ,为便于对比,我们采用透镜聚焦的方法,对两样品分别进行了测量,聚焦后的激光束半径  $a=0.035\text{mm}$ .分别照射石墨紫铜样品探测到的 PTR 振幅信号分别见图 2 中曲线  $c$  与图 3 中曲线  $c$ .可以看出,微分消卷积法所得结果在空间分辨率方面达到与聚焦法相同的结果.

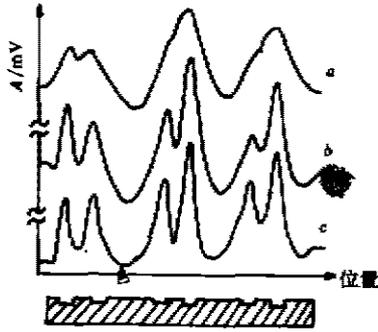


图 2 石墨样品刻痕的 PTR 信号以及消卷积结果

Fig. 2 PTR signal of scars of graphite sample and its deconvolution result  
a—unfocused, b—deconvolution, c—focused

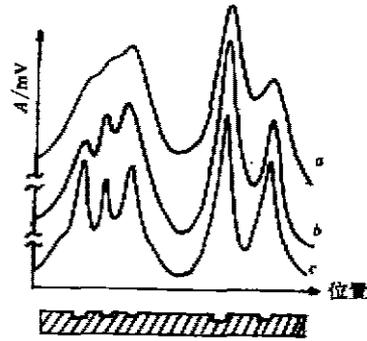


图 3 紫铜样品刻痕的 PTR 信号以及消卷积结果

Fig. 3 PTR signal of scars of copper sample and its deconvolution result  
a—unfocused, b—deconvolution, c—focused

另外, PTR 信号的空间分辨率与调制频率有关.理论和实验均说明:增加调制频率可提高空间分辨率<sup>[3]</sup>,但随着频率的提高, PTR 信号将逐渐减小,从而降低信噪比.图 4 中曲线  $a$  为调制频率  $f=9.14\text{Hz}$  时紫铜样品的 PTR 振幅信号,这时,两条刻痕很难分辨.当调制频率提高到  $f=34.5\text{Hz}$  时,两刻痕基本可分辨(见图 4 中曲线  $c$ ).但是测量曲线的信噪比已经较小.我们直接对  $f=9.14\text{Hz}$  的测量曲线进行了  $k=4$  的微分消卷积处理,结果见图 4 中曲线  $b$ ,两条刻痕已完全分辨,并且有较高的信噪比,可以看出,微分消卷积的结果明显优于提高调制频率所得的结果.

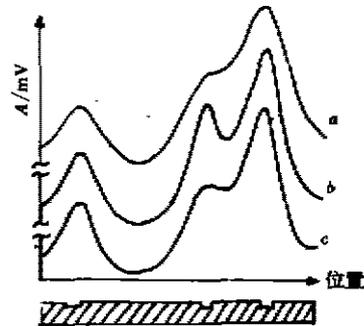


图 4 不同频率下铜刻痕的 PTR 信号以及消卷积结果

Fig. 4 PTR signal of scars of copper sample at different frequency and its deconvolution result  
a,  $f=9.14\text{Hz}$ , b, deconvolution, c,  $f=34.5\text{Hz}$

### 3 分析与讨论

微分消卷积法通过对实测曲线偶次微分的计算,并按不同的权重叠加,减小了传递线型函数的宽度,从而提高了 PTR 信号检测的空间分辨率.一般地,只要进行几次偶次微分的计算就能获得较高的分辨率.尤其是在利用了聚焦光

束或提高了调制频率后,刻痕仍无法分辨时,借助微分消卷积法将大大提高 PTR 检测系统的空间分辨率。

### 参考文献

- 1 Eordal P E, *et al. Infrared Phys.*, 1985, 25(2):295
- 2 Qian L, *et al. Appl. Opt.*, 1990, 29(28):4241
- 3 王 磊,李佩赞. *红外与毫米波学报*, 1994, 13(2):145
- 4 王 磊,李佩赞. *光学学报*, 1994, 14(10):1117
- 5 钱 霖,李佩赞. *光学学报*, 1990, 10(3):276
- 6 Kalkandjiev T K, *et al. Appl. Spectrosc.*, 1989, 43(1):44
- 7 方建兴,王定兴. *红外与毫米波学报*, 1991, 10(3):187
- 8 方建兴,王定兴. *光谱学与光谱分析*, 1991, 11(2):24
- 9 方建兴,王定兴. *红外与毫米波学报*, 1994, 13(2):140

## ENHANCEMENT OF SPATIAL RESOLUTION OF PTR SYSTEM USING THE DERIVATIVE DECONVOLUTION

Fang Jianxing Wang Qinhua Wang Dingxing Li Peizan

(Department of physics, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** The characteristic of the temperature field distribution of the photothermal radiometry (PTR) system and the effect of transfer function of the PTR system on the spatial resolution were analyzed. The derivative deconvolution method was applied to improve the spatial resolution of the real measurement curves. The results show that the derivative deconvolution can enhance the spatial resolution of the PTR system effectively.

**Key words** photothermal radiometry (PTR), derivative deconvolution, spatial resolution.